

УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_57

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ПРИСТЕННОЙ ОБЛАСТИ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ
В СИСТЕМЕ «ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВАЛ – ТЖМТ – СТЕНКА КРОНШТЕЙНА»**

Т.А. Бокова

ORCID: 0000-0002-7666-2866 e-mail: tatabo@bk.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

П.А. Боков

ORCID: 0000-0002-7805-6843 e-mail: bokow_pavel@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Н.С. Волков

ORCID: 0000-0003-2256-0984 e-mail: hortmetall@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.Р. Маров

ORCID: 0000-0003-4398-5631 e-mail: marov_2011@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Л.В. Баранова

ORCID: 0000-0002-9839-6036 e-mail: lubanya12@list.ru

Государственный региональный центр стандартизации,
метрологии и испытаний в Нижегородской области
Нижний Новгород, Россия

Определены физико-химические и трибологические характеристики пристенного слоя тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ). Представлены результаты экспериментальных трибологических исследований поверхностей трения системы «Вал – ТЖМТ – стенка кронштейна», проводимых на циркуляционном стенде со свинцовым теплоносителем. Исследования проводились применительно к условиям работы главных циркуляционных насосов установок малой и средней мощности с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым теплоносителем с горизонтальными парогенераторами (БРС ГПГ). Работы выполнялись на стенде ЭТС-2018 при температуре свинцового теплоносителя 440-500 °С.

Спроектирован и построен экспериментальный стенд для установления структуры пристенной области ТЖМТ с использованием методики экспресс-замораживания для объективной фиксации состояния в кольцевом зазоре ТЖМТ. Установлено, что пристенная область при вращательном движении представляет собой многокомпонентную структуру, в состав которой входят: оксидное покрытие на поверхностях сталей, сцепленных с оксидным покрытием отложения частиц примесей твердой фазы, газовая (парогазовая) прослойка, слой частиц примесей в пограничном турбулентном слое, пропитанных теплоносителем и свободно с ним перемещающихся. Пристенный слой в контурах с ТЖМТ представляет собой систему, где дисперсной средой является теплоноситель, содержащий дисперсную твердую фазу частиц примесей и газовую (парогазовую) фазу, которые ограничены поверхностью раздела. При вращательном движении дисперсная система не имеет четких границ, представляя собой перемешанную дисперсную среду.

Ключевые слова: свинцовый теплоноситель, трибология, пристенный слой, экспресс-замораживание, примеси, оксиды свинца, микротвердость, экспериментальный стенд, вращение, кольцевой зазор.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бокова, Т.А. Экспериментальное исследование состояния пристенной области в кольцевом зазоре в системе «Вращающийся вал – ТЖМТ – стенка кронштейна» / Т.А. Бокова, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.Р. Маров, Л.В. Баранова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 57-67.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_57

EXPERIMENTAL STUDY OF THE WALL AREA STATE IN ANNULAR GAP IN «ROTATING SHAFT – HLMC – BRACKET WALL» SYSTEM

T.A. Bokova

ORCID: **0000-0002-7666-2866** e-mail: **tatabo@bk.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

P.A. Bokov

ORCID: **0000-0002-7805-6843** e-mail: **bokow_pavel@mail.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

N.S. Volkov

ORCID: **0000-0003-2256-0984** e-mail: **hortmetall@yandex.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.R. Marov

ORCID: **0000-0003-4398-5631** e-mail: **marov_2011@mail.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

L.V. Baranova

ORCID: **0000-0002-9839-6036** e-mail: **lubanya12@list.ru**

Nizhny Novgorod state regional standardization, metrology and investigations center
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Physical-chemical and tribological characteristics of the wall layer of a heavy liquid metal coolant (HLMC) are determined. Results of experimental tribological studies of friction surfaces of the «Shaft – HLMC – bracket wall» system carried out on a circulation stand with a lead coolant, are presented. The studies were carried out in relation to the operating conditions of the main circulation pumps of low- and medium-power installations with fast neutron reactors cooled by a lead coolant with horizontal steam generators (LFNR-HSG). The work was carried out at ETS-2018 at a temperature of lead coolant 440-500 °C.

A testbed was designed and built to establish the structure of wall area of HLMC using the express freezing technique for objective fixation of the state in the annular gap of HLMC. It is established that the wall area under rotational motion is a multicomponent structure which includes an oxide coating on surfaces of steels bonded to the oxide coating deposits of solid phase impurity particles, a gas (vapor-gas) interlayer, a layer of impurity particles in the boundary turbulent layer impregnated with a coolant and freely moving with it. The wall layer in contours with HLMC is a dispersed system in which the dispersed medium is a coolant containing a dispersed solid phase of impurity particles and a gas (vapor-gas) phase bound by interface. In case of rotational motion, the dispersed system has no clear boundaries representing a mixed dispersed medium.

Key words: lead coolant, tribology, wall layer; express freezing, impurities, lead oxides; micro-hardness, experimental stand, rotation, annular gap.

FOR CITATION: Bokova T.A., Bokov P.A., Volkov N.S., Marov A.R., Baranova L.V. Experimental study of the wall area state in annular gap in «Rotating shaft – HLMC – Bracket wall» system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №3. Pp. 57-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_57

Введение

В настоящее время Госкорпорация «Росатом» реализует проект «Прорыв», направленный на разработку, проектирование и реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) и включающий продвижение реакторов на быстрых нейтронах. Одним из ключевых направлений проекта является разработка реакторных установок (РУ) на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ), в частности – свинец и эвтектика «свинец-висмут», являются перспективными как для реакторов на быстрых нейтронах большой мощности, так и для энергетических установок малой и средней мощности, являющихся источниками независимого энергообеспечения. В России накоплен значительный опыт по исследованиям физико-химических свойств свинца и его эффективного безопасного применения в атомной энергетике [1]. Одним из важных аспектов является контактное взаимодействие расплава свинца в качестве теплоносителя с поверхностями конструкционных материалов в пристенном слое. Эффект взаимодействия расплавленного металла с поверхностью применяемых сталей, вызванный условиями образования и массопереноса частиц примесей твердой и легкой фазы, в случае длительного обслуживания контуров с ТЖМТ может спровоцировать ухудшение коррозионно-эрозионных, теплогидравлических, триботехнических и других эксплуатационных характеристик циркуляционных стендовых и реакторных контуров [2]. В связи с этим, работы, направленные на исследования физико-химических и триботехнических характеристик взаимодействия слоев в потоке ТЖМТ, являются актуальными.

Одним из основных элементов любой ЯЭУ является главный циркуляционный насос и сопутствующее оборудование. В результате проведенных ранее исследований определено, что трибологические характеристики зон контактного взаимодействия свинца в циркуляционных контурах существенно влияют на работоспособность контактной пары (например, элементы проточной части насоса или гидростатические подшипники, работающие в среде ТЖМТ) [3]. В настоящее время в литературе отсутствуют данные о влиянии пристенного слоя на конструкционные материалы в системе «вал – жидкометаллический теплоноситель».

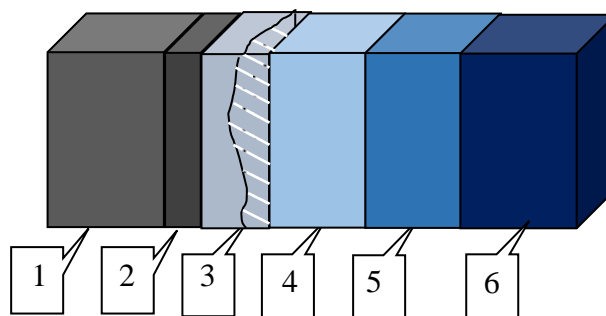


Рис. 1. Модель пристенной области взаимодействия поверхности конструкционного материала (стали) и расплава свинца

- 1 – конструкционный материал; 2 – оксидное защитное покрытие;
 3 – отложения компонентов примесей, пропитанных свинцом и слабо сцепленных со стенкой; 4 – прослойка «легкой фазы»;
 5 – поток свинца, обогащенный дисперсными примесями; 6 – ядро поток свинца

Fig. 1. Model of wall area of interaction of structural material (steel) surface and lead melt

- 1 – structural material; 2 – oxide protective coating;
 3 – deposits of impurity components impregnated with lead and weakly bonded to the wall;
 4 – «light phase» interlayer; 5 – lead flow enriched with dispersed impurities; 6 – lead flow core

Трибологические характеристики свинцового и свинцово-висмутового теплоносителя изучаются в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Получены и опубликованы результаты экспериментальных исследований характеристик пристенного слоя, выполняемых в приближенных к натурным условиям работы реакторной установки: материаловедческие испытания пристенной области расплава свинца с контактирующей с ним поверхностью сталей (рис. 1) [1], экспериментальные испытания процессов, возникающих в пристенной области при продольном возвратно-поступательном перемещении объектов в расплаве свинца [4], эксперименты, направленные на измерение потерь мощности при трении жидкого металла (свинца) о вращающийся вал насоса, а также параметров поверхности раздела фаз «свинец – газ» при вращении вала [5], трибологические параметры поверхности раздела фаз в среде теплоносителей и газовой подушки в ядерных реакторах на быстрых нейтронах АЭС [5-8].

Описанные в представленных работах результаты экспериментальных исследований не позволяют охарактеризовать процессы, происходящие в системе вращающегося с большой скоростью вала. Данная статья продолжает работы по исследованию состояния пристенной области в кольцевом зазоре в системе ВСК («вращающийся вал – расплав свинца – стенка кронштейна») экспериментального участка статического стенда со свинцовым теплоносителем при температуре до 500 °С.

Описание экспериментального стенда и методика исследований

Экспериментальные испытания проходили в лаборатории «Реакторная гидродинамика» на кафедре «Атомные и тепловые станции» Института ядерной энергетики и технической физики НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Для проведения работ был изготовлен экспериментальный стенд ЭТС-2018, схема которого представлена на рис. 2.

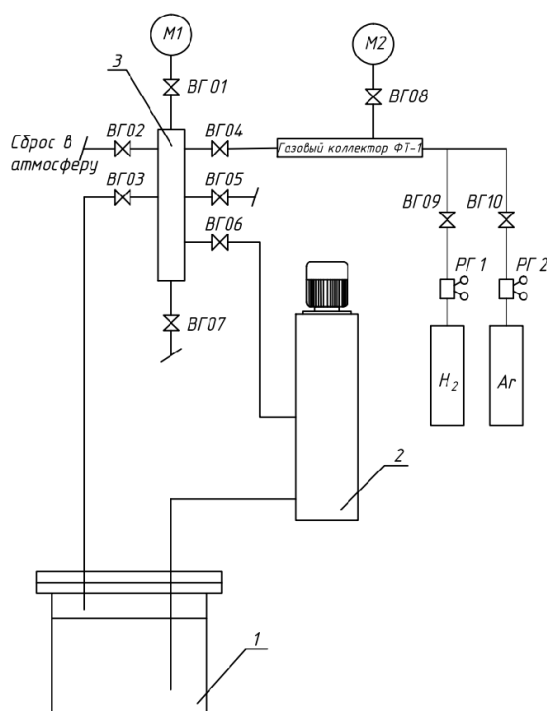


Рис. 2. Принципиальная схема стенда ЭТС-2018

1 – бак плавильный; 2 – экспериментальный участок; 3 – коллекторы газовой системы

Fig. 2. Schematic diagram of ETS-2018 testbed

1 – melting tank; 2 – experimental section; 3 – gas system collectors

Стенд включает в себя следующие основные элементы:

- испытательная установка с размещенными в ней моделью вала насоса и цилиндром, имитирующим кронштейн ГЦН;
- система обогрева корпуса экспериментального участка с секциями из нихромовых электроспиралей;
- емкость для плавления свинца;
- элементы систем технологии теплоносителя, заполнения и слива теплоносителя;
- подсистема технологии и качества свинцового теплоносителя;
- КИП, входящие в систему, обеспечивающую контроль, сбор и переработку получаемой информации.

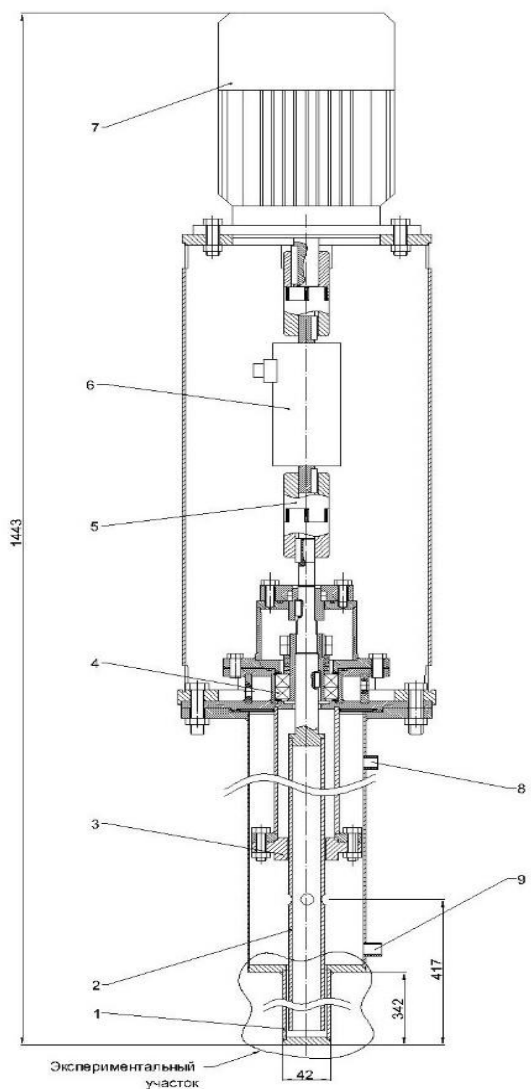


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки:

1 – гильза; 2 – вал; 3 – нижний подшипник; 4 – верхний подшипник;
5 – муфта; 7 – электродвигатель; 8 – подвод газа; 9 – подвод свинца

Fig. 3. General view of experimental setup:

1 – sleeve; 2 – shaft; 3 – lower bearing; 4 – upper bearing;
5 – coupling; 7 – electric motor; 8 – gas inlet; 9 – lead inlet

Основные емкости, трубопроводы и экспериментальный участок изготовлены из стали марки 12Х18Н10Т. Обогрев стенда осуществляется с помощью электрических секций мощностью 2 кВт. Экспериментальная сборка, имитирующая вращение вала циркуляционного насоса, позволяет исследовать характеристики пристенного слоя при вращательном движении в кольцевом зазоре между валом и цилиндром-имитатором, а также определить характеристики поверхности примененного конструкционного материала. На рис. 3 изображен общий вид экспериментальной установки. Для получения данных о пристенном слое после 50 и 100 час вращения вала в среде свинца со скоростью 700 об/мин (две серии экспериментов, проводимых последовательно), осуществляется отключение питания электродвигателя; демонтируется быстросъемный чехол для обогрева цилиндра-имитатора; экспериментальный участок мгновенно опускается в емкость с охлажденной водой (с добавлением льда). Затем отделяется нижняя часть вала длиной около 10 см совместно с цилиндром-имитатором. После этого производится трибологический анализ полученного участка на лабораторном оборудовании кафедры.

Результаты экспериментальных исследований

Как правило, в контурах с жидкометаллическим теплоносителем традиционно проводились материаловедческие исследования микротвердости участков конструкционного материала и его покрытий после удаления теплоносителя из анализируемых элементов или после остывания участка с жидким металлом за счет естественной конвекции (в атмосфере кислорода за длительный отрезок времени) [1]. Это не могло отразить полного и детального понимания структуры пристенной области «свинец – сталь». Приведенные далее результаты исследования экспериментального участка производились после мгновенной заморозки методом «экспресс-замораживания» в емкости с охлажденной водой с добавлением льда за кратковременный период.



Рис. 4. Кольцевой зазор «свинец-втулка» при 200-кратном увеличении ($T=450^{\circ}\text{C}$, $t=50$ ч, $a=10^{-1}\text{-}10^0$, $\gamma=700$ об/мин)

Fig. 4. «Lead-bushing» annular gap at 200x magnification ($T = 450^{\circ}\text{C}$, $t = 50$ h, $a=10^{-1}\text{-}100$, $\gamma = 700$ rpm)

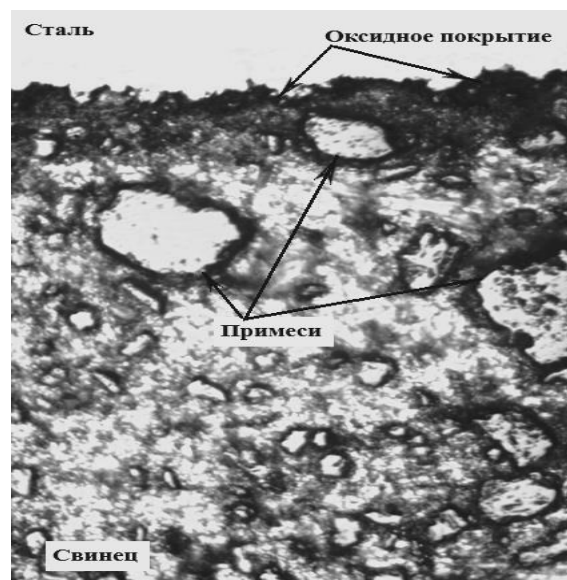


Рис. 5. Кольцевой зазор «свинец-втулка» при 400-кратном увеличении ($T=450^{\circ}\text{C}$, $t=100$ ч, $a=10^{-1}\text{-}10^0$, $\gamma=700$ об/мин)

Fig. 5. «Lead-bushing» annular gap at 400x magnification ($T = 450^{\circ}\text{C}$, $t = 100$ h, $a=10^{-1}\text{-}100$, $\gamma = 700$ rpm)

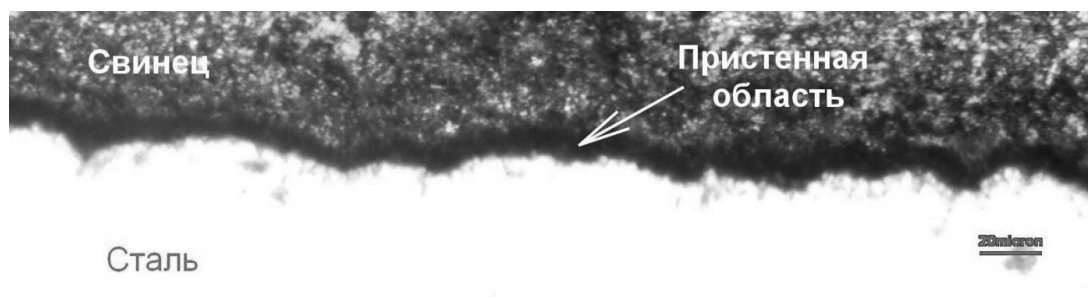


Рис. 6. Торцевая поверхность трубки экспериментального участка (увеличение 200 раз)

Fig. 6. End surface of tube of experimental section (200x magnification)

На рис. 4, 5 приведены фотографии поперечного шлифа образцов при 200- и 400-кратном увеличении после экспресс-замораживания циркулирующего ТЖМТ после первой ($t = 50$ час) и второй ($t = 100$ час) серии экспериментов соответственно при температуре свинцового теплоносителя $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ термодинамической активности кислорода в расплаве $\text{Pb} - 10^{-1}-10^0$ и скорости вращения вала-имитатора 700 об/мин. На рис. 6 представлена фотография шлифа торцевой поверхности трубки экспериментального участка. В процессе экспериментальных исследований, проведенных коллективом авторов ранее, было отмечено, что на фотографиях шлифов можно заметить примеси, оседающие на поверхности конструкционного материала. В процессе описываемых испытаний на аналогичных шлифах можно отметить, что примеси (в том числе, газообразные) находятся в состоянии однородной перемешанной среды с теплоносителем, сконцентрированные ближе к поверхности конструкционного материала (стали). При этом размеры частиц примесей не имели заметной роли при перераспределении в перемешанной с теплоносителем среде, их месторасположение хаотичное.

Как было установлено ранее в процессе многочисленных исследований, толщина оксидных пленок на поверхности стали у образцов на первом этапе проведенных экспериментов ($t = 50$ ч, $a = 10^{-1}-10^0$) значительно тоньше, чем у образцов второго этапа ($t = 100$ час, $a = 10^{-1}-10^0$). Толщина оксидной пленки на поверхности влияла на процесс отделения застывшего свинца из стальных труб для создания образцов для материаловедческого анализа. Ранее были получены результаты экспериментальных исследований полей температур и скоростей в потоках свинцового и свинец-висмутового теплоносителей при контроле и регулировании содержания примесей, которые подтверждают предположение о том, что размер и перераспределение примесей в потоке свинцового теплоносителя напрямую зависит от характеристик и состояния циркуляционного контура со свинцовым теплоносителем. В процессе описываемых испытаний после проведения материаловедческих исследований были получены величины отложений примесей после второго этапа ($t = 100$ час, $a = 10^{-1}-10^0$) на отдельных участках около нескольких десятков мм.

После проведения материаловедческих испытаний и внешнего осмотра образцов, полученных на первом этапе испытаний, можно заметить области смачивания поверхности конструкционного материала (аустенитная сталь 08X18H10T) свинцом и начало развития коррозионно-эрозионного изнашивания в условиях проводимых исследований. Процесс изнашивания проявляется как растворение поверхностных слоев стали, а в дальнейшем – необратимая деформация кристаллической решетки с выносом атомов в пристенный слой жидкого металла (время работы – 50 час). Вариант, при котором поверхность стали и расплав свинца не контактируют в связи с наличием агента – газовой или парогазовой прослойки, состоящей из растворенных газообразных веществ и малого количества воды, исключает разрушение поверхности конструкционного материала. При этом происходит эффект несмачивания, что гарантирует стойкость конструкционных материалов в среде расплава свинца [1]. В ходе экспериментальных исследований были проведены измерения микротвердости. Они проводились по регламенту ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы.

Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения». Этот метод заключался в определении зависимости размера отпечатка стандартной пирамидки на исследуемом образце от величины усилия нажатия этой пирамидки на образец. Использовалось оборудование лаборатории «Реакторная гидродинамика» Shimadzu HMV-2T. Результаты измерений сведены в табл. 1. На рис. 7 представлены сравнительные результаты двух образцов, полученных в процессе исследования при вращении в кольцевом зазоре, и образцов, полученных при возвратно-поступательном движении.

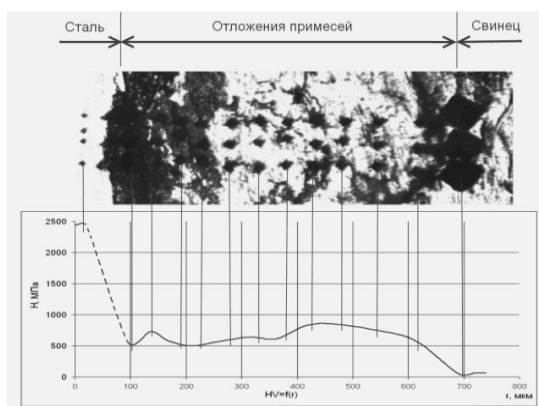
Таблица 1.

Микротвердости пристенной области по Виккерсу
(условия получения образцов: $t = 50$ час, $T = 450$ °C, $\gamma = 700$ об/мин)

Table 1.

Vickers microhardness of wall area (conditions for sampling: $t = 50$ h, $T = 450$ °C, $\gamma = 700$ rpm)

HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6
213	201	205	207	198	208
220	228	239	220	232	227
6,64	9,1	11	8,31	11,1	9,48
6,9	8,12	8,19	8,3	8,3	8,32
6,56	9,23	8,76	8,3	8,21	8,3
6,27	8,04	7,16	8,3	8,15	8,15
7,56	8,12	7,58	8,5	8,29	7,55
8,07	7,54	10,4	9,47	8,32	8,3
8,11	9,04	9,55	10	10,3	8,89
224	204	198	218	234	259
220	198	197	213	242	218



а)



б)

Рис. 7. Микротвердость пристенной области
а) при циркуляции в трубопроводе; б) при вращении в кольцевом зазоре

Fig. 7. Microhardness of wall area
a) when circulating in pipeline; b) when rotating in annular gap

Исследования профиля поверхности полученных образцов проводились в лабораториях «Реакторная гидродинамика» НГТУ на приборе TR220, а также в лаборатории ФБУ «Нижегородский ЦСМ» с помощью профилометра «Surftest SJ-410 MITUTOYO». По результатам были построены графические зависимости профилей поверхности и шероховатостей, примеры которых представлены на рис. 8. На рис. 8а представлены шероховатость и профиль поверхности образца 3.1, который выдерживался в контуре циркуляции свинцового теплоноси-

теля при температуре 450 °С в течение 50 час при значении активности кислорода, близкой к насыщению, образец отделен с внешней поверхности имитатора вала. На рис. 8б представлены шероховатость и профиль поверхности образца 4.1, который выдерживался в контуре циркуляции свинцового теплоносителя при тех же условиях проведения эксперимента, что и образец 3.1, но в течение 100 час отделенный от внутренней части гильзы, являющейся элементом экспериментальной емкости.

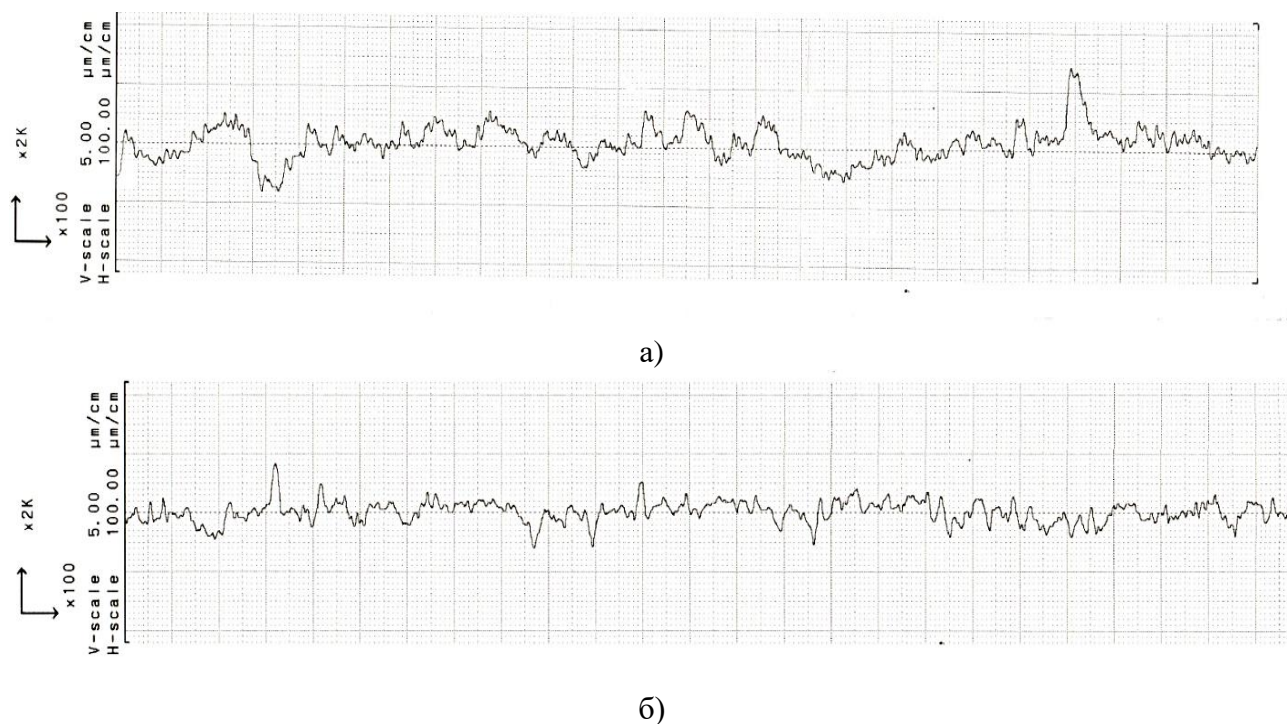


Рис. 8. Результаты исследований профилей поверхности и шероховатостей образцов
а) образец № 3.1; б) образец № 4.1

Fig. 8. Surface profiles and sample roughness research results
a) sample No. 3.1; б) sample No. 4.1

Можно заметить, что при работе контактной пары «поверхность конструкционного материала – пристенный слой потока ТЖМТ» наблюдается незначительный рост величины шероховатостей поверхностей сталей в сравнении с образцом той же марки стали, но не устанавливаемым в контур циркуляции, а выдержанным в течение того же периода времени при тех же температурах, что и образец, установленный в контур ТЖМТ и с исходным образцом, не участвовавшим в проведении экспериментов и взятым за «нулевой». Результаты экспериментальных исследований зависимости значений шероховатости от временного фактора показали, что при одинаковых условиях проведения исследований образцы, находившиеся в расплаве свинца разное время, имеют отличающиеся значения шероховатости. При увеличении времени выдержки в 2 раза с 50 до 100 час наблюдалась тенденция к уменьшению величин параметров Ra и Rz ответных поверхностей экспериментального участка. Этот факт можно объяснить тем, что при вращательном движении, организованном для элементов экспериментального участка в узком зазоре, происходит постоянное перемешивание слоев пристенной области в расплаве свинца. Также возможно, что на пристенный слой и на частицы примесей влияют центробежные и центростремительные силы. Это может приводить к снижению скорости подвода «свободного» кислорода к поверхностям сталей, а также перераспределению примесей в пристенной области, что, в свою очередь, может приводить к замедлению образования оксидной защитной пленки на поверхностях сталей. Доказано, что

разрушение и невозможность восстановления оксидной защитной пленки на поверхностях конструкционных материалов приводит к эффектам смачивания ТЖМТ поверхностей сталей и быстрому коррозионно-эрозионному их разрушению.

По результатам исследований шлифов под микроскопом было замечено наличие примесных частиц между трущимися поверхностями имитатора вала, расплава свинца и поверхностью гильзы (рис. 3) на всех этапах проведения исследования.

При проведении исследований шлифов образцов, взятых на этапе исследований методом «экспресс-замораживания», была подтверждена и построена модель пристенной области, которая состоит из пяти заметных слоев: слой 1 – стальной, слой 2 – защитное оксидное покрытие, слой 3 – крупинчатый, состоящий из разрозненных отложений, пропитанных расплавом свинца вследствие эффекта несмачиваемости, слой 4 – вихревой слой свинца, содержащий значительное количество примесей, слой 5 – основной поток свинца в котором заметны отдельные частицы примесей. Также в редких случаях можно было заметить каверны в единичных образцах, свидетельствующие о наличии газовой или парогазовой фазы и в пристенной области и в потоке расплава свинца.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают предложенную модель пристенной области при вращательном движении в узком кольцевом зазоре в среде расплава свинца. Ранее предполагалось, что пристенный слой состоит условно из шести слоев различной толщины: первый слой – конструкционный материал; второй слой – оксидное защитное покрытие; третий слой – отложения компонентов примесей, пропитанных свинцом и слабо сцепленных со стенкой; четвертый слой – прослойка «легкой фазы»; пятый слой – поток свинца, обогащенный дисперсными примесями; шестой слой – ядро потока свинца. Исследования образцов, полученных в результате проведенных экспериментов, подтвердили наличие подобных слоев в слое свинцового теплоносителя при вращении вала-имитатора в узкой щели. Четких границ вышеуказанных слоев в принятых условиях замечено не было, в сравнении с экспериментальными данными при возвратно-поступательном движении стального образца в узком зазоре со свинцовым теплоносителем в корпусе из стали. Было обнаружено образование почти однородной субстанции с отсутствием резких переходных зон между слоями.

При вращательном движении структура пристенной области меняется, что ведет к изменению шероховатости поверхности образцов сталей, контактирующих со свинцовым теплоносителем в узком щелевом зазоре. С ростом времени выдержки образцов в контуре с ТЖМТ в условиях эксперимента их шероховатость уменьшается. Это можно объяснить тем, что только со временем происходит образование защитной оксидной пленки, которая в условиях эксперимента образует более ровное покрытие по сравнению с поверхностью исходного (не использованного в эксперименте) металла, оксидное покрытие которого было образовано при производстве и дальнейшем хранении на воздухе. Этот эффект может повлиять на работу трущихся поверхностей, погруженных в расплав свинца (свинца-висмута) реакторных установок с ТЖМТ. Работоспособность узлов (гидростатические подшипники или трущиеся пары системы управления защиты, зубчатые зацепления и т.д.) в среде ТЖМТ зависит от наличия на поверхностях контактных пар защитных оксидных покрытий, с возможностью их восстановления в процессе работы.

Результаты представленных исследований могут быть интересны разработчикам и проектантам энергетических контуров с жидкометаллическим охлаждением.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт. 2006. – 370 с.
2. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование контактных пар трения в механизмах, работающих в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.И. Шумилков // Трибология – машиностроению: труды XI Международной научно-технической конференции. М.: Институт компьютерных исследований, 2016. С. 11-12.
3. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование контактных пар трения в механизмах, работающих в ТЖМТ / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.И. Шумилков, Д.С. Забоева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы 2016. № 4. С. 53-63.
4. **Баранова, Л.В.** Исследование структуры пристенного слоя при движении свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре / Л.В. Баранова, А.Н. Белов, В.А. Гадетов, Р.А. Коротаев // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2018. С. 117-121.
5. **Безносков А.В.** Экспериментальные исследования по определению потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса, и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, Н.С. Лукичев, В.А. Гадетов, А.Г. Мелузов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. №1(120). С. 81-90.
6. **Безносков, А.В.** Исследование структуры пристенного слоя при движении свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, Н.В. Серов // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019: Сборник материалов научно-практической конференции. 2019. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 78.
7. **Безносков, А.В.** Обоснование работоспособности гидростатического подшипника, в условиях реакторных контуров со свинцово-висмутовым теплоносителем при температурах 200-350°C / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Р. Маров, Н.С. Лукичев // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции. 2019. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 297-298.
8. **Баранова, Л.В.** Определение пристенного слоя ТЖМТ в системе «вал-ТЖМТ-стенка» / Л.В. Баранова, П.А. Боков, В.А. Гадетов // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2018: сборник материалов научно-практической конференции. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. С. 5.

Дата поступления

в редакцию: 15.12.2020